

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO *RIVER2D* VISANDO À MODELAGEM ECOHIDROLÓGICA DO RIO FORMOSO (MG)

Iara de Castro e Oliveira^{1*}; *Gabriela Vieira Capobianco*²; *Hugo Alexandre Soares Guedes*³;
*Demetrius David da Silva*⁴; *Vitor Souza Martins*² & *Luana Lisboa*⁵

Resumo – O presente trabalho objetivou calibrar o modelo hidrodinâmico *River2D* visando à realização da modelagem ecohidrológica no rio Formoso (MG). Foram quantificadas, *in situ*, variáveis hidráulicas e hidrológicas – velocidade, profundidade, vazão e substrato – em quatro campanhas de campo, além de ter sido realizado o levantamento topobatimétrico de um trecho de 1km do rio Formoso, para compor a base de dados de entrada do modelo. Para fins da calibração foram utilizados três módulos do modelo computacional: *River Bed*, *River Mesh* e *River2D*, propriamente dito. De acordo com os resultados obtidos em cada módulo foram realizados ajustes na malha de elementos finitos, com o auxílio de ferramentas disponíveis de edição, para a obtenção de resultados seguros e precisos. Os índices estatísticos utilizados para validar os resultados do processo de calibração (coeficiente de determinação e erro médio absoluto) apresentaram valores satisfatórios – 0,95 e 8,64% para R^2 e EMA, respectivamente, para a variável hidráulica profundidade, e 0,66 e 19,68%, nessa mesma ordem, para a variável hidráulica velocidade. A calibração do modelo *River2D* foi considerada bem sucedida e o modelo considerado apto para realizar a modelagem ecohidrológica do rio Formoso (MG).

Palavras-Chave: Ecohidrologia; *River2D*; Calibração.

CALIBRATION OF THE HYDRODYNAMIC MODEL *RIVER2D* FOR THE ECOHYDRAULIC MODELLING OF FORMOSO RIVER (MINAS GERAIS)

Abstract – The present study aimed to calibrate the hydrodynamic model *River2D* for a section of 1 km long of Formoso River (MG) with the purpose of performing its ecohydraulic modeling. Several hydrologic and hydraulic variables were quantified *in situ* - velocity, depth, discharge and substrate – through four field campaigns, and a topobatimetry survey of the studied area was conducted to compose the model's input database. At the calibration process, three modules of the model were used: *River Bed*, *River Mesh* e *River2D*. According to the results obtained in each module, adjustments were made on the finite element mesh, with the aid of available editing tools, in order to obtain precise and reliable results. The statistical indices used to validate the results of the calibration process (coefficient of determination and mean absolute error) presented satisfactory values – 0.95 and 8.64% for R^2 and MAE, respectively, to the hydraulic variable of depth and 0.66 and 19.68%, in that same order, to the hydraulic variable of velocity – . *River 2D* model calibration was considered successful and the model is able to perform the ecohydrologic modeling of Formoso River (MG).

Keywords: Ecohydrology; *River2D*; Calibration.

¹ Mestranda em Engenharia Agrícola, Recursos Hídricos e Ambientais, DEA/UFV, CEP 36570-000, Viçosa/MG. E-mail: iaracasoli@yahoo.com.br.

* Autor Correspondente responsável pela submissão

² Bolsista de Iniciação Científica CNPq, DEA/UFV, CEP 36570-000, Viçosa/MG. E-mail: gvcapobianco@gmail.com; vityormartins9@yahoo.com.br.

³ Professor Adjunto I, CEng/UFPEl, Departamento de Engenharia Civil, CEP 96010-280, Pelotas/RS. E-mail: hugo.hydro@gmail.com.

⁴ Professor Associado IV, DEA/UFV, CEP 36570-000, Viçosa/MG. E-mail: demetrius@ufv.br.

⁵ Doutoranda em Engenharia Agrícola, Recursos Hídricos e Ambientais, DEA/UFV, CEP 36570-000, Viçosa/MG. E-mail: luanaeaufv@yahoo.com.br.

INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram marcadas pela crescente preocupação com as ações antropogênicas sobre o meio ambiente. Em várias regiões do mundo os recursos hídricos estão se tornando o fator limitante não apenas ao desenvolvimento, mas até mesmo à manutenção de algumas comunidades. O crescimento exponencial da população humana e de suas necessidades cria e amplifica os numerosos impactos sobre os ecossistemas hídricos, resultando na perda de muitas das suas funções originais, bem como da biodiversidade e da integridade ecológica de tais ambientes (Zalewski, 2000).

No que diz respeito à gestão de recursos hídricos, anteriormente os estudos hidrológicos eram focados no controle de eventos catastróficos e no suprimento de água. No entanto, a tendência atual é que se busque, cada vez mais, o conhecimento da relação hidrologia-biota, visando entender fatores e processos interativos que ocorrem nos ecossistemas para a conservação integrada dos recursos hídricos. Surge, então, a Ecohidrologia, estudo das inter-relações funcionais entre hidrologia e biota que utiliza os ecossistemas aquáticos como ferramenta base para a gestão dos recursos hídricos (UNEP-IETC, 2004).

Nesse sentido, o desenvolvimento de modelos matemáticos computacionais para sistemas de suporte à decisão tem sido uma importante ferramenta para testar cenários alternativos e implementar metodologias ecohidrológicas visando à gestão sustentável do uso da água e dos ecossistemas aquáticos.

Os modelos baseados na relação entre habitat e o regime de vazões, usualmente denominados modelos de simulação de habitat, ou ainda, modelos ecohidrológicos, são vantajosos na medida em que se baseiam em uma análise conjunta de dados hidrológicos, hidráulicos e biológicos.

Dentre os modelos de simulação de habitat existentes, o *River2D* tem sido o mais utilizado em estudos ecohidrológicos ao redor do mundo (Boavida, 2007), consistindo em um modelo hidrodinâmico bidimensional hidráulico e de habitat, desenvolvido especificamente para uso em rios e córregos naturais. Foi desenvolvido na Universidade de Alberta, no Canadá, e é um modelo fundamentado no método de Elementos Finitos, baseado na formulação conservadora de Petrov-Galerkin, sendo capaz de apresentar soluções em seções de fluxo subcríticos e supercrítico, secas ou molhadas, cobertas ou não com neve (Steffler e Blackburn, 2002).

A ferramenta computacional associada ao *River2D* é formada por quatro módulos: *River Bed*, *River Ice*, *River Mesh* e o *River2D*, propriamente dito; os quais são usualmente utilizados em ordem sequencial. Seu processo de modelagem envolve, basicamente, a criação e edição de dados da topografia do canal e de seu entorno por meio dos módulos *River Bed* e *River Ice*; a geração da malha de Elementos Finitos por meio do módulo *River Mesh* e, por fim, no módulo *River2D*, a realização das simulações hidráulica e de habitat para a malha gerada (Steffler e Blackburn, 2002).

Contudo, o bom desempenho de um modelo hidrodinâmico, isto é, a sua capacidade em representar de forma acurada as condições reais do curso de água a ser modelado, depende da qualidade dos dados de entrada do modelo e do êxito no processo de calibração do mesmo. Segundo Boavida (2007), uma das componentes mais importantes na modelagem hidráulica e do habitat pístico é a fase de calibração, em que se deve buscar a representação mais precisa possível do sistema físico para a obtenção de resultados que reflitam a realidade da forma mais fiel possível.

Diante do exposto, este trabalho objetivou calibrar o modelo hidrodinâmico *River2D* para um trecho do rio Formoso (MG), visando à realização da modelagem ecohidrológica.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado no rio Formoso, afluente da margem direita do rio Pomba, localizado na região oeste da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, entre os paralelos 21°18' e 21°27' Sul e os meridianos 43°10' e 43°38' Oeste, o qual possui 76,7 km de extensão. A bacia do rio Formoso abrange parte dos municípios mineiros de Oliveira Fortes, Aracitaba, Tabuleiro e Santos Dumont, ocupando uma área aproximada de 398 km².

A região de estudo, com área de contribuição igual a 180,7 km² e 1 km de extensão, localiza-se nas porções íngremes do relevo da bacia, próximo a Conceição do Formoso, distrito de Santos Dumont, e possui áreas mais preservadas com a presença de mata ciliar e condições naturais, ou seja, sem a presença de urbanização.

Obtenção dos dados de entrada do modelo *River2D*

Para a realização da calibração do modelo hidrodinâmico *River2D* são necessários dados relacionados às características físicas e hidráulicas do curso de água em estudo. Estes parâmetros se resumem às seguintes variáveis: velocidade, vazão, profundidade e substrato (material aluvionar) do leito do rio, além de dados da topografia do canal e de seu entorno.

O trecho em estudo foi dividido em três seções transversais de monitoramento, distanciadas de 500 metros entre si, onde foram coletados os dados de velocidade, vazão, profundidade e substrato, em quatro campanhas de campo. Tais campanhas foram realizadas ao longo de dois anos, duas em período seco (Junho de 2011 e Julho de 2012) e duas em período chuvoso (Março de 2011 e Fevereiro de 2012).

Para a caracterização da topografia do canal e de seu entorno, foi realizado um levantamento topobatimétrico, em Junho de 2012, ao longo de toda região de estudo, sendo demarcado o perfil batimétrico em seções transversais de 10x10 metros. Demarcaram-se, também, alguns pontos localizados nas margens do curso de água, contabilizando um total de 1.578 pontos, georreferenciados por meio de GPS geodésico.

Para o modelo *River2D*, a caracterização do substrato do leito do curso de água é traduzida por meio de valores de rugosidade efetiva (k_s). Desse modo, utilizou-se a relação proposta por Glawdel *et al.* (2011) para tipo de substrato e rugosidade efetiva correspondente para compor a base da dados de entrada do modelo.

Calibração

Durante o processo de calibração utilizaram-se três módulos do modelo *River2D*, a citar: *River Bed*, *River Mesh* e *River2D*. O arquivo gerado em cada módulo serve como dado de entrada para outro. Desse modo, utilizaram-se, sequencialmente, os módulos conforme a ordem apresentada.

A primeira etapa de calibração foi realizada no módulo *River Bed*, onde foram inseridos os dados característicos do levantamento topobatimétrico e da rugosidade efetiva, por meio da criação de nós computacionais editáveis, refletidos em valores das coordenadas geográficas x e y, altitude z e rugosidade. Tais dados foram inseridos em formato de arquivo texto, sendo posteriormente editados visando à inserção de nós adicionais, criação de linhas de quebra e edição nó a nó dos valores de rugosidade, como etapa fundamental ao procedimento de calibração do modelo.

Ainda nesse módulo, foram discriminados o limite inundável do curso de água em estudo e as seções de entrada e saída do trecho. A direção do fluxo foi indicada por meio das linhas de quebra, interligando os pontos do levantamento topobatimétrico (nós computacionais), indicando o sentido do escoamento na modelagem.

Em seguida, utilizou-se o módulo *River Mesh* para gerar a malha computacional. Para tanto, foi necessário introduzir o arquivo referente à topografia do leito, previamente criado e editado no módulo *River Bed*.

O modelo foi calibrado, inicialmente, com resolução de malha de elementos finitos equivalente a cinco metros. Posteriormente, foi necessário refinar a malha computacional para ajustar os dados simulados aos dados obtidos nas campanhas de campo, através de operações sucessivas de edição – criação de nós adicionais e linhas de quebra – para o melhoramento da mesma. Finalizou-se a malha com os valores equivalentes a cinco metros nas margens do curso de água, três metros dentro da calha, e um metro nos pontos mais críticos dentro do trecho em estudo do rio Formoso.

A aferição da qualidade da malha foi realizada através do parâmetro Índice de Qualidade, QI (*Quality Index*), cujos valores encontraram-se entre 0,4 e 0,87, considerados satisfatórios segundo Waddle e Steffler. (2002). Depois de obtido um resultado satisfatório para qualidade da malha, o arquivo gerado foi utilizado como dado de entrada para o módulo *River2D*.

No módulo *River2D* foram executadas simulações considerando a vazão de calibração, comparando-se os resultados preditos de diferentes variáveis hidráulicas com os valores observados em campo. Na calibração do modelo seguiu-se variando de forma sucessiva a distribuição de rugosidade efetiva (edição nó a nó), no módulo *River Bed* e, por conseguinte, gerando uma nova malha computacional no módulo *River Mesh*, objetivando-se encontrar um melhor ajuste entre os valores medidos e os valores simulados das variáveis hidráulicas, observado no módulo *River2D*.

O modelo foi calibrado para vazão equivalente a $6,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, correspondente à vazão medida na seção transversal coincidente com a seção de entrada do trecho em estudo, mensurada na primeira campanha de campo, realizada em Abril de 2011. A validação da calibração foi realizada por meio dos índices estatísticos coeficiente de determinação (R^2) e erro médio absoluto (EMA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1 e 2 estão apresentadas a profundidade e a velocidade de escoamento ao longo do trecho estudado no rio Formoso para a vazão de calibração equivalente a $6,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Observa-se que a profundidade e a velocidade máxima encontradas foram equivalentes a 1,45 m e $3,09 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Profundidade (m)

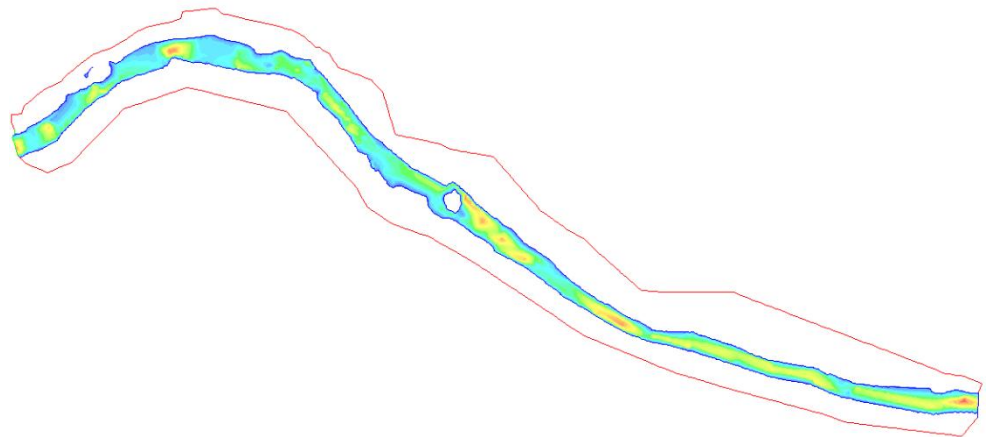
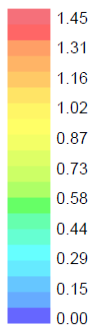


Figura 1 – Representação da profundidade de escoamento ao longo do trecho monitorado no rio Formoso com a vazão de calibração equivalente a $6,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Velocidade (m s⁻¹)

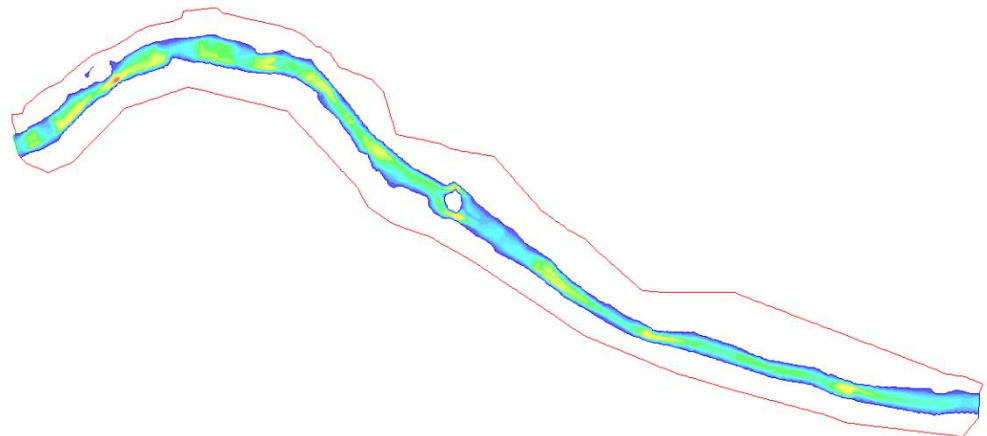
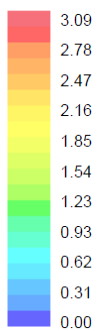


Figura 2 – Representação da velocidade de escoamento ao longo do trecho monitorado no rio Formoso com a vazão de calibração equivalente a $6,41 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados da calibração realizada no modelo *River2D* para o trecho monitorado no estudo, avaliando-se a diferença entre os valores observados em campo e os simulados (preditos) para as variáveis hidráulicas profundidade e velocidade, respectivamente.

Na Tabela 1 estão discriminados, ainda, os índices estatísticos utilizados para validar os resultados desse processo de calibração.

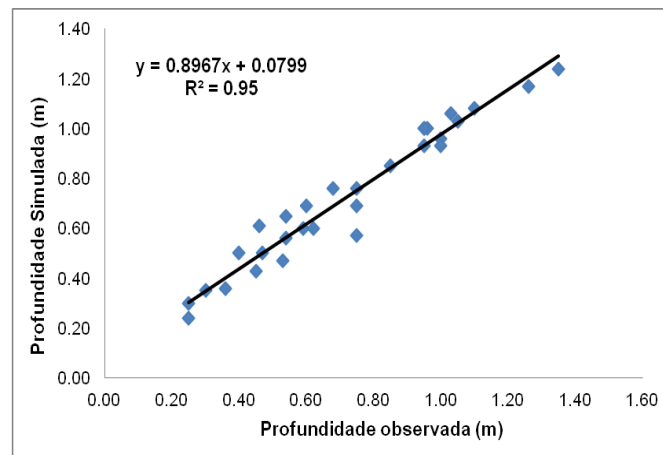


Figura 3 - Correlação entre os dados observados e simulados de profundidade para o trecho monitorado do rio Formoso.

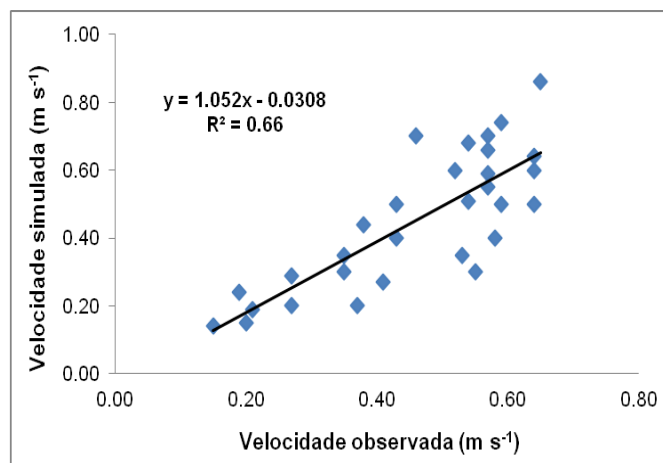


Figura 4 - Correlação entre os dados observados e simulados de velocidade para o trecho monitorado do rio Formoso.

Tabela 1 - Índices estatísticos utilizados para validar a calibração do modelo hidrodinâmico *River2D* no trecho de estudo do rio Formoso

Variável hidráulica avaliada	EMA (%)	R ²
Profundidade	8,64	0,95
Velocidade	19,68	0,66

Observa-se na Tabela 1 que o valor encontrado para o coeficiente de determinação (R^2) para a variável hidráulica profundidade indica um excelente ajuste entre os dados simulados e observados no trecho monitorado do rio Formoso. Além disso, o valor encontrado do índice Erro Médio Absoluto (EMA) para essa variável é inferior àqueles encontrados por Chou e Chuang (2010) e Jowett e Duncan (2011) – 11,70% e 18,00%, respectivamente –, em que as malhas geradas foram consideradas aptas à modelagem hidráulica dos cursos de água estudados.

A variável hidráulica velocidade apresentou coeficiente de determinação R^2 menor que a variável de profundidade, obtendo um ajuste inferior entre os dados simulados e observados no trecho monitorado do rio Formoso.

Nesse sentido, Boavida (2007) afirma que o perfil de distribuição das velocidades é mais difícil de ajustar, em especial em modelos bidimensionais, na medida em que essa variável é expressivamente sensível a alterações na morfologia do leito do canal. O autor atribui menores ajustes na calibração da variável velocidade a prováveis alterações na morfologia do leito do canal no período que separa as medições de campo e o levantamento topobatimétrico efetuado para compor a base de dados de entrada do modelo *River2D*. Tal justificativa corrobora com as condições de realização deste estudo, na medida em que os perfis de velocidade utilizados no processo de calibração do modelo foram mensurados em condições hidrológicas distintas daquelas correspondentes à época de realização do levantamento topobatimétrico (períodos chuvoso e seco, respectivamente).

No entanto, os valores encontrados para os índices estatísticos em questão apontam ajustes compatíveis àqueles encontrados em outros trabalhos do gênero, quando considerada a variável hidráulica velocidade. Jowett e Duncan (2011) encontraram valores de R^2 e EMA equivalentes a 0,62 e 34,00%, respectivamente, como resultados da calibração realizada no modelo *River2D*. Nesse mesmo contexto, Booker *et al.* (2004) e Gard (2010) encontraram valores de R^2 equivalentes a 0,67 e 0,69, respectivamente. Nesses estudos, os valores encontrados para tais índices não indicaram ajustes excelentes, porém satisfatórios para a realização das modelagens hidráulica e de habitat dos cursos de água estudados.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a calibração do modelo *River2D* foi bem sucedida e o modelo está apto a realizar simulações hidráulicas e de habitat para o rio Formoso (MG).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que viabilizaram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOAVIDA, I.M.B.M. (2007). *Análise bidimensional na determinação dos caudais ecológicos: aplicação do modelo River2D*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa – PT, 178 p.
- BOOKER, D.J.; DUNBAR, M.J.; IBBOTSON, A. (2004). Predicting juvenile salmonid drift-feeding habitat quality using a three-dimensional hydraulic-bioenergetic model. *Ecological Modelling*, v. 177, pp. 157 – 177.
- CHOU, W-C.; CHUANG, M-D. (2010). Habitat evaluation using suitability index and habitat type diversity: a case study involving a shallow forest stream in central Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 172, pp. 689 – 704.

GARD, M. (2010). Response to Williams (2010) on Gard (2009): comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models. *Int. J. River Basin Manage*, v. 8, pp. 121 – 125.

GLAWDEL, J.; KWAN, S.; NAGHIBI, A.; MILLAR, R. G.; LENCE, B. (2011). Using River2D Morphology to Predict Salmon Redd Survival during High Flow Events from Hydroelectric Dam Operations. In *Anais do I World Environmental and Water Resources Congress*, ASCE, Palm Springs, California, EUA, Maio 2011, pp. 2562 – 2571.

JOWETT, I.G.; DUNCAN, M.J. (2011). Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river. *Ecological Engineering*, v.48, pp. 92 – 100.

STEFFLER, P.; BLACKBURN, J. (2002). *Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat*. University of Alberta, Canadá, 120 p.

UNEP – The United Nations Environment Programme, IETC – International Environmental Technology Centre. (2004). *Integrated Watershed Management-Ecohydrology & Phytotechnology - Manual*. In: Zalewski, M., Wagner-Lotkowska I. (ed.), Venice, Osaka, Warsaw, Lodz, 208 p.

WADDLE, T.; STEFFLER, P. (2002). *Mesh Generation Program for River2D Two Dimensional Depth Averaged Finite Element: Introduction to Mesh Generation and User's Manual*. U.S. Geological Survey, 31 p.

ZALEWSKI, M. (2000). Ecohydrology - the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, v. 16, pp.1 – 8.